

УДК 535.21

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ В АТМОСФЕРЕ ИЗЛУЧЕНИЯ, ГЕНЕРИРУЕМОГО МНОГОКАНАЛЬНОЙ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМОЙ С КОГЕРЕНТНЫМ СЛОЖЕНИЕМ.

### Ч. 2. ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЙ И ИХ КОМПЕНСАЦИЯ

Ф.Ю. Канев<sup>1,2</sup>, Е.И. Цыро<sup>1</sup>, Н.А. Макенова<sup>1,2</sup>, Д.С. Куксенко<sup>3</sup>, О.Л. Антипов<sup>4</sup><sup>1</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

E-mail: mna@iao.ru

<sup>2</sup>Томский политехнический университет<sup>3</sup>Томский государственный университет<sup>4</sup>Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

Исследована передача энергии на расстояние при помощи многоканальной оптической системы. Изучено влияние случайных фазовых набегов и атмосферной турбулентности на параметры светового поля в плоскости фокусировки. Рассмотрена возможность использования алгоритма апертурного зондирования для коррекции случайных фазовых искажений, возникающих в многоканальной системе.

**Ключевые слова:**

Многоканальная оптическая система, источники аберраций, адаптивное управление лазерным пучком, алгоритм апертурного зондирования.

**Key words:**

Multichannel optical system, aberration sources, adaptive control over laser beam, multidither algorithm.

**Влияние на эффективность передачи энергии случайных фазовых набегов, возникающих в каналах оптической системы**

Авторами экспериментальных работ [1, 2] отмечено, что одним из факторов, снижающих эффективность передачи энергии в многоканальной лазерной системе, являются случайные фазовые набег, возникающие в каждом из каналов. В статье [2] было показано, что характерная частота таких искажений составляет несколько кГц и при достаточном быстродействии (компенсация выполнялась на 10 кГц) набег могут быть скомпенсированы. Дополняя выполненные ранее исследования, в настоящей статье рассматривается влияние случайных набегов на качество излучения при различной геометрии расположения оптических волокон на излучающей апертуре и различном их числе и оценивается возможность компенсации искажений на трассах различной длины.

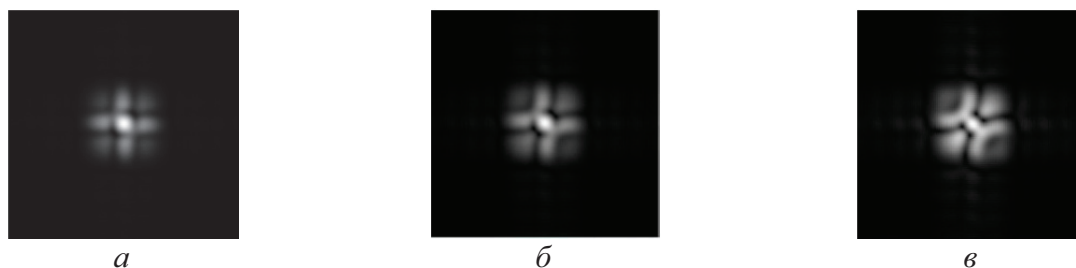
При моделировании искажений случайные набег были равномерно распределены в определенном интервале, ширина которого изменялась. Таким образом, варьируемыми параметрами задачи

являлись число и геометрия расположения пучков, их размеры, интервал задания случайных искажений, расстояние от генератора до плоскости регистрации (как и в первой части статьи, длина трассы нормируется на дифракционную длину излучения).

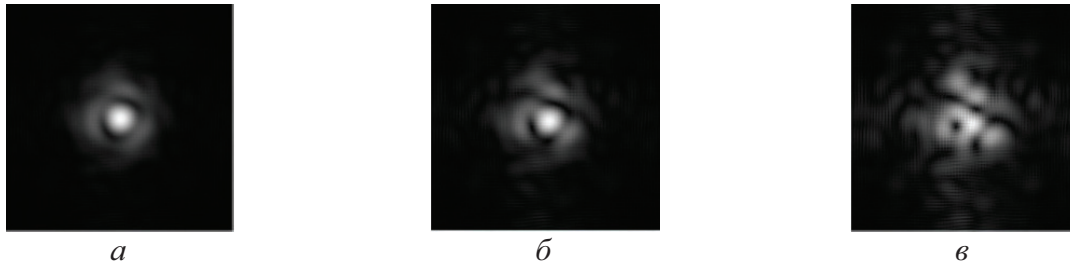
Проявление данного типа аберраций иллюстрируется на рис. 1 и 2, где приводятся амплитудные распределения излучения в плоскости наблюдения, полученные при генерации излучения системой, включающей 4 и 8 каналов.

Рисунки качественно демонстрируют искажения интерференционной картины, и уменьшение энергии, попадающей в центральный максимум при увеличении интервала случайных набегов.

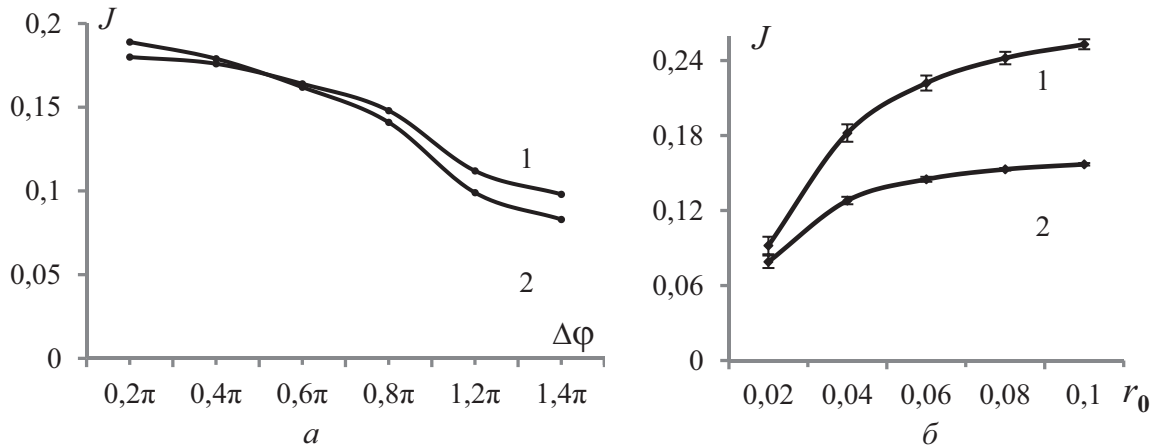
Количественные характеристики процесса передачи энергии приводятся на рис. 3, где критерий фокусировки для оптических систем с 4 и 8 каналами представлен в виде функции, зависящей от интервала фазовых вариаций. Данные были получены на трассах с длинами  $Z$ , равными 2,5 и 3,5, т. е. для условий, когда передача энергии оптоволоконным лазером является наиболее целесообразной.



**Рис. 1.** Распределение интенсивности излучения в плоскости наблюдения, полученное при наличии случайных фазовых набегов в системе включающей 4 канала, длина трассы  $Z=2,5$ , расстояние между центрами  $d=2$ , интервал случайных набегов: 0,4π (а); 0,8π (б); 1,4π (в) радиан



**Рис. 2.** Распределение интенсивности в плоскости наблюдения для системы с 8 каналами. Длина трассы  $Z=3,5$ . Интервалы фазовых набегов такие же, как на предыдущем рисунке



**Рис. 3.** Зависимость критерия фокусировки  $J$  от величины случайных фазовых набегов для систем с 4 и 8 оптическими каналами, длина трассы  $Z=2,5$  (кривая 1) и  $Z=3,5$  (2)

При  $\Delta\varphi=0,2\pi$  пучки распространяются в условиях, близких к условиям свободной дифракции, искажения здесь очень малы, соответствующие значения критерия практически совпадают с данными, приводимыми в части статьи для идеальных условий. При этом использование системы с 8 каналами обеспечивает результаты на 15...20 % более высокие, по сравнению с четырехканальной системой. С увеличением интервала вариаций фазовых набегов во всех случаях наблюдается уменьшение значений критерия, и для трасс большей длины регистрируются меньшие значения. При максимально возможных для используемой численной модели вариациях фазы  $\Delta\varphi$  (при  $\Delta\varphi=1,4\pi$ ) на трассе  $Z=2,5$  критерий равен 0,10 для геометрии излучателя, включающей четыре элементарных пучка, и 0,09 для восьми пучков, при увеличении длины до 3,5 получаем  $J=0,08$  (четыре волокна) и 0,06 (восемь волокон). Таким образом, при значительных фазовых искажениях пучков на более короткой из трасс обе рассмотренные системы обеспечивают практически одинаковую эффективность передачи энергии, для трасс большей длины ( $Z=3,5$ ) использование системы с восемью пучками, целесообразное при отсутствии искажений, дает меньшие значения критерия фокусировки.

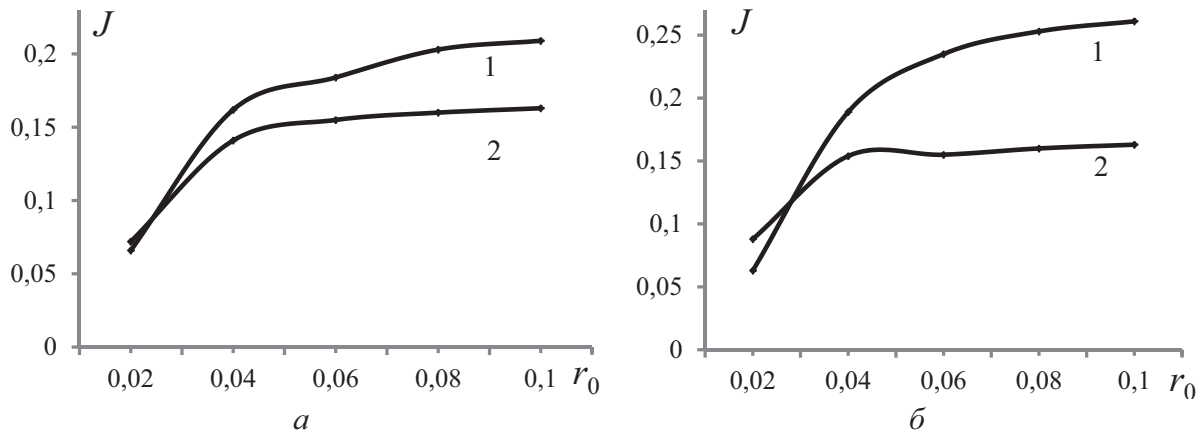
Анализ распространения пучков был выполнен и для трасс большей длины, при этом численные эксперименты проводились для систем включающих 4 и 8 каналов. Как и в предыдущем случае на длинных трассах наблюдалось снижение кон-

траста центрального максимума и уменьшения критерия  $J$  при увеличении интенсивности искажений.

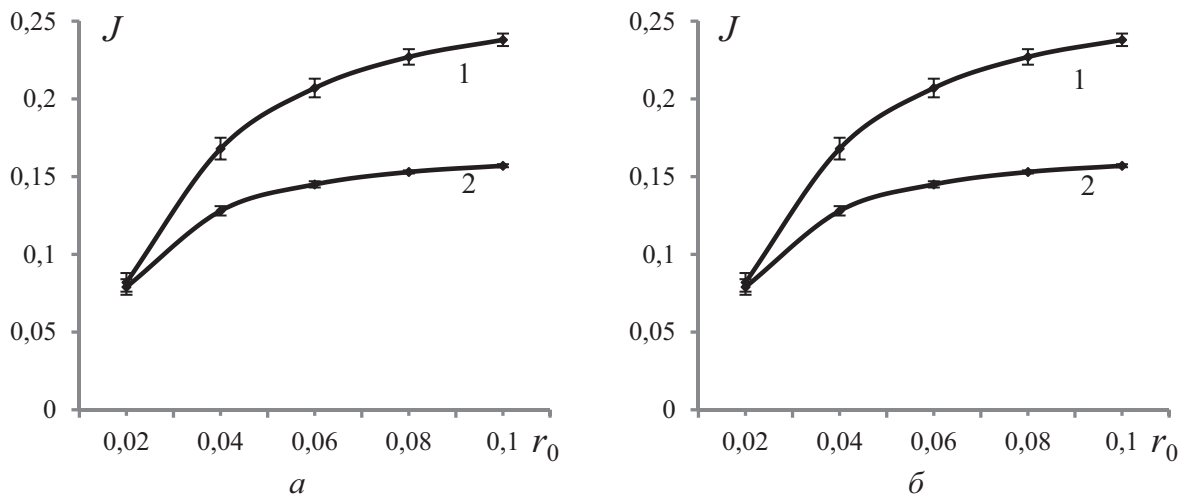
#### Распространение излучения при наличии турбулентных искажений

Влияние атмосферной турбулентности на развитие искажений лазерного излучения изучено достаточно хорошо. Проведено множество теоретических и экспериментальных исследований в данном направлении, выявлены основные закономерности, описаны характерные aberrации пучков, выполнено сравнение теоретических и экспериментальных данных, полученных для плоских и сферических волн [3–5]. В то же время, можно ожидать, что при распространении в турбулентной среде мультипучкового излучения проявятся какие-либо новые особенности, нетипичные для гауссовского пучка. Поэтому здесь приводятся результаты численных экспериментов, характеризующие распространение рассматриваемого излучения в атмосфере.

На рис. 4 приведена зависимость критерия фокусировки  $J$  от интенсивности турбулентности  $r_0$  [4], которая была получена для одной из реализаций набора фазовых экранов ( $r_0$  – радиус Фрида нормирован на начальный радиус элементарного пучка). Данные соответствуют гауссовскому пучку и многоканальной системе с 4 и 8 каналами. Можно видеть, что практически во всем диапазоне изменений  $r_0$  изучаемая оптическая система обеспе-



**Рис. 4.** Зависимость критерия фокусировки от интенсивности турбулентных искажений, полученная для мультиканальной оптической системы (кривая 1, система 4 (а) и 8 (б) каналами) и для гауссовского пучка (кривая 2) на одной из реализаций  $Z=3,5$



**Рис. 5.** Параметры численного эксперимента соответствуют предыдущему рисунку. Представлены усредненные результаты

чивает более высокие, чем обычный лазерный источник, результаты.

На основе приведенных результатов можно сделать вывод о том, что использование мультиканальной системы для передачи энергии является более эффективной в турбулентной среде по сравнению с обычным одномодовым лазером.

Усредненные по 100 реализациям случайных экранов значения критерия, регистрируемые в турбулентной среде, представлены на рис. 5.

Все закономерности, отмеченные при анализе одной из реализаций, остались без изменения. Таким образом, основной вывод, сделанный ранее, справедлив и для усредненных результатов.

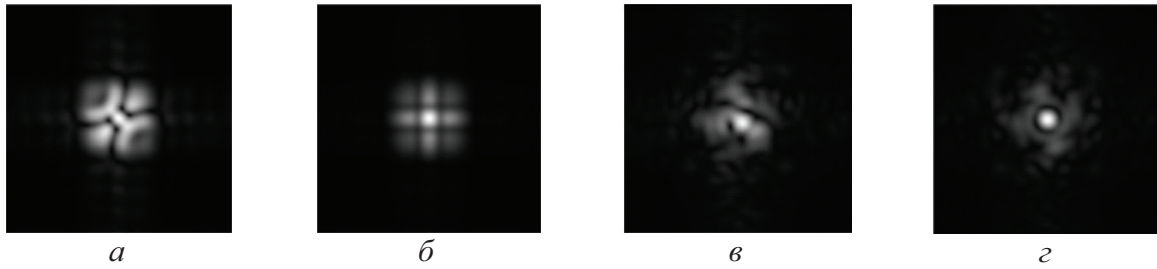
#### **Коррекция случайных фазовых искажений, возникающих в многоканальной лазерной системе**

Рассматривается возможность коррекции искажений, обусловленных случайными фазовыми набегами, возникающими в каналах оптической системы. Управление пучком проводится на основе алгоритма апертурного зондирования, подробное описание которого приведено выше.

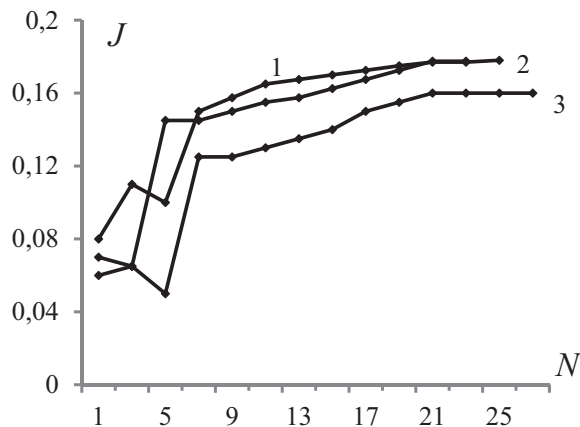
Распределение интенсивности светового поля до и после коррекции при различной геометрии расположения излучателей на апертуре системы представлено на рис. 6.

Рисунки показывают, как в искаженном световом поле в результате использования апертурного зондирования формируется центральный, достаточно хорошо выраженный максимум. Следовательно, адаптивное управление параметрами излучения позволяет улучшить качество излучения на объекте фокусировки.

Использование апертурного зондирования для коррекции случайных искажений иллюстрируется на рис. 7–9, где показано изменение критерия фокусировки в итерационном процессе. Приведенные данные были получены для трасс различной длины (на всех рисунках кривая 1 соответствует  $Z=2,5$ , 2 –  $Z=3,5$  и 3 –  $Z=4,5$ ) для систем с 4 (рис. 7) и 8 каналами (рис. 8 и 9). При выполнении численных экспериментов также варьировалась интенсивность случайных искажений, возникающих в каналах оптической системы. Так, данные, приводимые на рис. 7 и 8, были получены при  $\Delta\varphi=1,5\pi$  рад, а на рис. 9 – при  $\Delta\varphi=3\pi$  рад.



**Рис. 6.** Распределение интенсивности излучения в плоскости наблюдения, регистрируемое при наличии искажений (а и в), и полученное в результате коррекции (б и г). Длина трассы  $Z=2,5$ , интервал случайных фазовых искажений  $\Delta\varphi=1,5\pi$ , расстояние между центрами  $d=2$ , система с 4 (а, б) и 8 каналами (в, г)



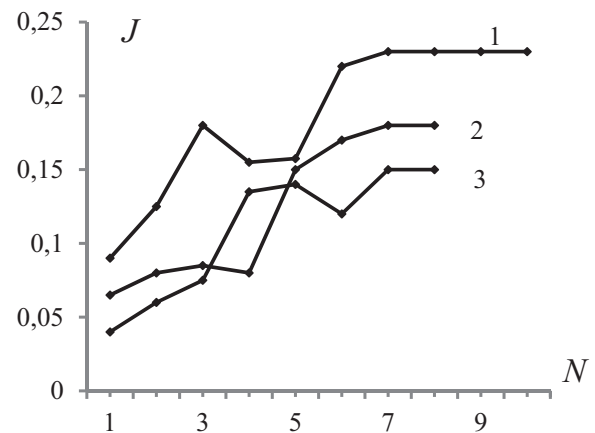
**Рис. 7.** Изменение критерия фокусировки  $J$  в процессе адаптивного управления.  $N$  – номер итерационного шага. Данные получены для системы четырьмя пучками. Номера кривых соответствуют длинам трасс  $Z=2,5$  (кривая 1),  $Z=3,5$  (кривая 2) и  $Z=4,5$  (кривая 3). Интервал фазовых искажений  $\Delta\varphi=1,5\pi$  рад

Влияние длины трассы на результирующие значения критерия фокусировки для оптической системы с 4 каналами иллюстрируется на рис. 7. Можно видеть, что увеличение пройденного расстояния от 2,5 до 3,5 дифракционных длин не приводит к уменьшению эффективности коррекции искажений, в обоих случаях в результате коррекции получаем значения критерия приблизительно равные 0,18. При дальнейшем увеличении расстояния (кривая 3,  $Z=4,5$ ) значения  $J$  уменьшаются.

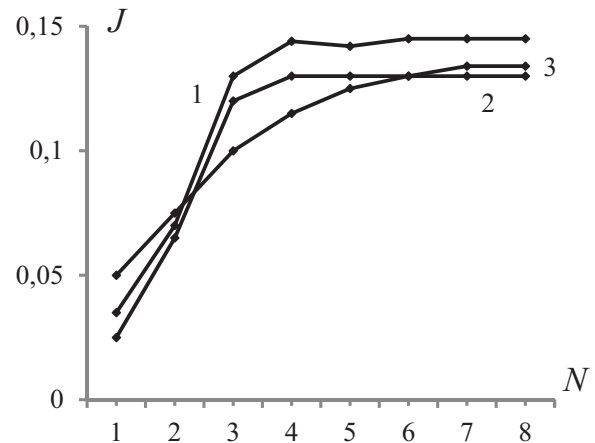
Более выраженная зависимость эффективности коррекции от длины трассы наблюдается при использовании системы с 8 каналами (рис. 8), для которой результирующие значения  $J$  отличаются на 20...25 %.

Наиболее высокое значение критерия фокусировки  $J$  в результате коррекции было получено в системе с восьмью каналами на длине трассы  $Z=2,5$  (рис. 8, кривая 1,  $\Delta\varphi=1,5\pi$ ). В точно таких же условиях система с четырьмя каналами (рис. 7, кривая 1) обеспечивала значительно меньшие значения критерия  $J(t)$ , т. е. эффективность передачи энергии при помощи 8-ми пучковой системы на 20...30 % больше по сравнению с системой, образованной 4-я каналами. Однако на более длинных трассах ( $Z=2,5...4,5$ ) где эффективность коррекции уменьшается, это различие менее выражено. Или другими

словами: если искажения скомпенсировать невозможно, не имеет значения, сколько пучков мы используем для передачи энергии.



**Рис. 8.** Результат коррекции искажений при генерации излучения системой с 8 каналами. Остальные данные соответствуют предыдущему рисунку



**Рис. 9.** Повторение результатов предыдущего численного эксперимента при увеличении интервала фазовых искажений до  $3\pi$  рад

Эффективность коррекции также уменьшается при увеличении интервала случайных фазовых искажений. Соответствующие данные для восьми пучков представлены на рис. 9. В этом случае результирующие значения критерия не превышают 0,15, кривые для трасс  $Z=2,5$  и  $Z=4,5$  отличаются не более чем на 0,03, отличие между трассами  $Z=3,5$  и  $Z=4,5$  практически не регистрируется.

Приведенные данные показывают, что при использовании алгоритма апертурного зондирования наблюдается уменьшение эффективности коррекции при увеличении интенсивности искажений. При этом эффективность управления зависит от числа элементарных пучков, образующих излучающую апертуру, и лучшие, наиболее близкие к дифракционно-ограниченным результатам значения критерия были получены для системы, сформированной восьмью оптическими волокнами на длине трассы  $Z=2,5$ .

#### Выводы

1. Изучена возможность передачи энергии лазерного излучения в турбулентной оптической среде с использованием многоканальной оптической системы.
2. Показано, что значительное уменьшение критерия фокусировки (приблизительно в 4 раза)

с увеличением ширины интервала фазовых искажений наблюдается для системы, сформированной 8-ю оптическими волокнами.

3. Установлено, что в турбулентной среде многоканальная система позволяет улучшить качество фокусировки излучения в плоскости приемника по сравнению с одномодовым лазерным пучком. При высокой интенсивности искажений (радиус Фрида менее 0,04) значения критерия фокусировки приближаются к значениям, характерным для гауссовского излучения.
4. При использовании алгоритма апертурного зондирования для компенсации искажений, возникающих в системе, эффективность коррекции при увеличении ширины интервала случайных фазовых набегов снижается. Эффективность управления зависит от числа и геометрии расположения пучков на излучающей апертуре; лучшие результаты наблюдаются для системы с восьмью пучками.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fotiadi A.A., Zakharov N., Antipov O.L., Megret P. All-fiber coherent combining of Er-doped amplifiers through refractive index control in Yb-doped fibers // Opt. Lett. — 2009. — V. 34. — № 22. — P. 3574–3576.
2. Xinyan Fan, Jingjiao Liu, Jinsheng Liu, Jingli Wu. Experimental investigation of a seven-element hexagonal fiber coherent array // Chinese Optics Letters. — 2010. — V. 8. — № 1. — С. 48–51.
3. Ахманов С.А., Воронцов М.А., Кандидов В.П., Сухорук А.П., Чесноков С.С. Тепловое самовоздействие световых пучков и методы его компенсации // Известия вузов. Сер. Радиофизика. — 1980. — Т. 23. — № 1. — С. 1–22.
4. Влияние атмосферы на распространение лазерного излучения / под ред. В.Е. Зуева. — Томск: Изд-во ТФ СО РАН, 1987. — 246 с.
5. Банах В.А., Смалихо И.Н. Распространение лазерных пучков на вертикальных и наклонных протяженных трассах через турбулентную атмосферу // Оптика атмосферы и океана. — 1993. — Т. 6. — № 4. — P. 377–384.

Поступила 05.03.2012 г.